

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Богатова Максима Валерьевича на тему: «Влияние состава, структуры и свойств внутренних многофункциональных покрытий насосно-компрессорных нефтепромысловых труб на образование асфальтосмолопарафиновых отложений», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение

### АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При добыче нефти все более острой становится проблема образования асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) внутри насосно-компрессорных труб (НКТ), по которым в скважине добываемый продукт доставляется на поверхность. Это связано с постоянным увеличением добычи более вязких нефтей, а также переходом нефтяной промышленности на позднюю стадию разработки месторождений. При подъеме нефтяного флюида вследствие осаждения асфальтосмолопарафиновых отложений происходит сужение внутреннего сечения насосно-компрессорных труб вплоть до их полной закупорки, остановки дебита скважины и необходимости проведения дальнейших мероприятий по очистке НКТ. Простои оборудования, энерго- и трудозатраты на спускоподъемные и очистные операции приводят к большим экономическим потерям. Среди различных методов борьбы с АСПО все большее внимание уделяется применению защитных покрытий на внутренней поверхности НКТ из-за простоты, долговечности и эффективности этого метода. Особенно привлекательно применение для этой цели антикоррозионных покрытий, которые уже достаточно широко используются в НКТ. В этом случае внутреннее покрытие становится многофункциональным и защищает НКТ от действия нескольких осложняющих факторов при добыче нефти.

Однако существующие методы исследований защитных внутренних покрытий, применяемых в нефтяной отрасли, практически ограничиваются антикоррозионными покрытиями. О пригодности внутреннего покрытия НКТ для защиты от АСПО добывающие компании вынуждены судить по результатам длительных и дорогих опытно-промысловых испытаний (ОПИ) труб с таким покрытием на конкретном месторождении. Существует настоятельная потребность в разработке значительно более быстрых и менее дорогих лабораторных методов оценки эффективности внутренних покрытий НКТ в защите от образования АСПО как для замены опытно-промысловых испытаний, так и для разработки новых, более эффективных многофункциональных внутренних покрытий НКТ.

На основании вышеизложенного можно заключить, что тема диссертационной работы Богатова М.В. является актуальной, основная цель которой состоит в исследовании взаимосвязи состава, структуры и свойств внутренних многофункциональных покрытий на НКТ с образованием АСПО, а также разработке методики и лабораторного циркуляционного стенда для оценки способности этих

покрытий предотвращать образование АСПО в динамических условиях движущейся нефтяной среды.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка использованных источников из 118 наименований. Работа содержит 162 страницы основного текста, 31 рисунок, 10 таблиц и 4 приложения.

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, научное и прикладное значение работы, основные положения, выносимые на защиту, обосновано соответствие паспорту научной специальности 2.6.17. Материаловедение, представлена структура диссертационной работы, а также информация об апробации работы и публикациях автора.

*В первой главе* представлен комплексный аналитический обзор научно-технической литературы. Обсуждена природа асфальтосмолопарафиновых отложений, включая их состав, образование, физические и химические свойства. Рассмотрены методы борьбы с АСПО, мероприятия по удалению и предотвращению образования данных отложений. Заметное место уделено методу защиты от образования АСПО путем использования функциональных покрытий на внутренних поверхностях НКТ, который считается одним из самых перспективных. В работе также представлены общие сведения о наиболее распространенных функциональных покрытиях, их составе, структуре и методах определения свойств. Описаны лабораторные установки, используемые для моделирования образования АСПО.

*Во второй главе* представлены выбранные для проведения диссертационных исследований покрытия, методики проведения испытаний, приборы и оборудования, на которых проводились эксперименты. Выбраны наиболее распространенные для защиты НКТ внутренние многофункциональные покрытия: наполненные полимерные марок MPLAG 17 и ГИОТЭК 110М, а также силикатно-эмалевое марки МК-5. Данные покрытия наносились заводами-изготовителями на серийные насосно-компрессорные трубы, сегменты (отрезки) которых следующего типоразмера: наружный диаметр 73 мм, толщина стенки 5,5 мм, длиной 150 мм, использовались в качестве образцов при проведении экспериментов.

*В третьей главе* проанализированы существующие лабораторные установки и стенды, которые в настоящее время применяются для оценки образования АСПО, обозначены их недостатки. С учетом этих недостатков разработаны и изготовлены два оригинальных лабораторных циркуляционных стенда, позволяющих более достоверно моделировать условия образования АСПО в скважинах на внутренней поверхности НКТ с различными видами нанесенных многофункциональных покрытий. Первый стенд рассчитан на диапазон скоростей циркуляции нефтяной среды в стенде от 0,05 м/с до 0,75 м/с, что соответствует малодебитным скважинам, второй модернизированный стенд - на более высокие скорости нефтяного потока от 0,5 м/с до 4,0 м/с для моделирования условий в высокодебитных скважинах. Как первый вариант, так и второй защищены патентами РФ на полезную модель и

изобретение соответственно.

*В четвертой главе* рассмотрены результаты определения фазового состава, структурных особенностей, а также свойств покрытий в статических условиях отсутствия или неподвижности нефтяной среды. Показано, что только по соотношению таких статических характеристик покрытий между собой как шероховатость, адгезия парафина к сухой поверхности, краевой угол смачивания дистиллированной водой в отдельности нельзя судить об относительной стойкости внутренних функциональных покрытий к предотвращению образования АСПО в движущейся нефтяной среде. Но в главе предложена оригинальная методика предварительной, качественной экспресс-оценки внутренних многофункциональных покрытий к предотвращению образования АСПО по другим статическим характеристикам - за счет измерения краевых углов смачивания покрытий водой и нефтью в воде, которые являются показателями гидрофильности и олеофобности покрытий. Наглядно это показано на примере силикатно-эмалевого покрытия марки МК-5, которое обладает лучшими как гидрофильными, так и олеофобными свойствами, и является наиболее эффективным в защите от АСПО.

*В пятой главе* приведены результаты исследования на разработанных лабораторных циркуляционных стендах закономерностей образования АСПО на внутренних многофункциональных покрытиях НКТ в динамических условиях путем установления зависимостей массы асфальтосмолопарафиновых отложений от таких основных параметров движущейся нефтяной среды как градиент температуры, скорость нефтяного потока и время воздействия. Малое отличие зависимости массы отложения АСПО от градиента температуры для разных внутренних поверхностей НКТ объяснено малыми скоростями потока нефтяной среды в первом варианте лабораторного стенда. При испытаниях зависимостей массы АСПО от скорости потока и от времени выдержки на модернизированном стенде с повышенными скоростями нефтяного потока уже наблюдается существенная градация покрытий по способности сопротивляться образованию АСПО на внутренней поверхности исследуемых образцов. Наименьшей массой отложений обладает покрытие МК-5, затем расположены полимерные покрытия MPLAG 17 и ГИОТЭК 110М с большей, примерно равной массой отложений, а наибольшей массой отложений обладает образец НКТ без покрытия из марки стали 35ХМ. Эти данные по расположению покрытий в соответствии с их способностью сопротивляться образованию АСПО, полученные на модернизированном стенде, совпадают с данными опытно-промышленных испытаний. Даны объяснения найденным экспериментально зависимостям массы отложений от параметров нефтяного потока и предложена формула для расчета эффективности данного метода предотвращения образования АСПО за счет нанесения внутренних многофункциональных покрытий.

*Основные выводы* органично завершают диссертационную работу. Выводы обоснованы, полностью отвечают задачам и результатам исследований.

Диссертация представляет собой законченную работу, логично изложена с использованием современной научной терминологии. Результаты диссертационной

работы опубликованы в виде четырех научных статей в рецензируемом научном журнале «Нефтегазовое дело», входящем в базу данных RSCI и в 1-ю категорию К1 Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ для защиты диссертаций по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки), а также в 1 патенте РФ на полезную модель и 1 патенте РФ на изобретение. Основные результаты диссертации доложены на шести научно-технических конференциях.

Текст автореферата полностью соответствует тексту диссертации. Основное содержание диссертации, выводы и положения, выносимые на защиту, достаточно полно отражены в автореферате. Результаты диссертационной работы имеют важное значение для отечественной нефтегазовой отрасли и развития материаловедения в этой отрасли.

### НАУЧНАЯ НОВИЗНА И НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

В диссертационной работе М.В. Богатова представлены результаты, обладающие научной новизной, имеющие высокую достоверность и научную значимость. Наиболее важными результатами являются следующие:

1) Впервые для наиболее распространенных внутренних многофункциональных покрытий разных классов на НКТ проведены сравнительные исследования связи их состава, структуры и свойств, определенных в статических условиях отсутствия или неподвижной нефтяной среды, с эффективностью защиты от образования АСПО на полноразмерных сегментах НКТ в динамических условиях движущейся нефтяной среды.

2) Показано, что такие, определенные в статических условиях, свойства поверхностей покрытий как шероховатость, адгезия парафина к сухой поверхности, угол смачивания сухой поверхности дистиллированной водой в отдельности не отражают в полной мере способность поверхностей сопротивляться образованию АСПО в динамических условиях движущейся нефтяной среды.

3) Предложен оригинальный метод определения краевого угла смачивания поверхностей покрытия нефтью в воде, результаты которого позволяют судить об олеофобности этих поверхностей. Для исследованных внутренних многофункциональных покрытий разных классов подтверждено, что для противодействия образованию АСПО поверхность должна быть одновременно гидрофильной и олеофобной для нефти в воде.

4) Разработаны два лабораторных циркуляционных стенда для моделирования условий формирования АСПО на внутренней поверхности НКТ как в низкодебитных, так и высокодебитных скважинах. Новизна этих разработок подтверждена двумя патентами РФ. Данные стенды позволяют создавать поток нефтяной среды с различной скоростью и температурой и образовывать слой АСПО на внутренней поверхности сегментов серийных НКТ с различными видами внутренних поверхностей при различных температурах охлаждения.

5) Проведены испытания сегментов серийных НКТ с исследуемыми внутренними многофункциональными покрытиями на разработанных и

изготовленных лабораторных циркуляционных стендах в динамических условиях движущейся нефтяной среды. Получены и объяснены зависимости количества АСПО на сегментах НКТ от таких параметров потока нефтяной среды как градиент температуры, скорость потока и время воздействия. Полученные результаты испытаний на лабораторных стендах соответствуют результатам опытно-промысловых испытаний.

#### ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

1) Разработанные лабораторные циркуляционные стенды и методика их применения использованы в ООО «Научно-производственный центр «Самара» для оценки эффективности многофункциональных покрытий предотвращать образование АСПО на внутренней поверхности НКТ или увеличивать межочистной период.

2) Результаты диссертационных исследований Богатова М.В. также использованы в ООО «РН-БашНИПИнефть», г. Уфа, где выполнялись работы по формированию «Схемы испытаний НКТ с покрытием для применения на кластерах месторождений Компании» с целью замены опытно-промысловых испытаний на лабораторные (стендовые) испытания для сокращения времени принятия решений об эффективности предлагаемых покрытий. В итоге этой работы в январе 2023 года было принято решение о переходе в Компании на лабораторные испытания.

#### СООТВЕТСТВИЕ ПАСПОРТУ ЗАЯВЛЕННОЙ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

Тема диссертационной работы и ее содержание полностью соответствует паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки) по пунктам 1 и 6:

п.1. «Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры материалов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности материалов и изделий».

п. 6. «Разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств материалов на образцах и изделиях».

#### ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДОВ

Степень обоснованности результатов, положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, определяется использованием современного оборудования и аттестованных методик исследований, соответствием полученных результатов результатам других авторов и опытно-промысловых испытаний, непротиворечивостью полученных выводов и заключений существующим представлениям, а также подтверждается результатами практического применения в ООО «Научно-производственный центр «Самара» и ООО «РН-БашНИПИнефть».

Вместе с тем, диссертационная работа не лишена недостатков.

## ЗАМЕЧАНИЯ ПО СОДЕРЖАНИЮ РАБОТЫ

1) В литературном обзоре слишком много внимания уделено образованию асфальтосмолопарафиновых отложений, причем с повторением некоторых моментов, и заметно меньше - использованию защитных покрытий на внутренних поверхностях НКТ, хотя, по моему мнению, должно быть наоборот.

2) В четвертой главе при исследовании структуры покрытий не приведены данные по остаточной пористости получаемых покрытий.

3) При исследовании свойств покрытий не измерена теплопроводность, которая может сказаться на градиенте температуры в нефтяном потоке и на образовании отложений.

4) При испытании полимерных покрытий не уделено должное внимание на возможные процессы старения и физико-химического взаимодействия с нефтяной средой, приводящие к изменению состава, структуры и свойств покрытий во времени.

5) Четвертая глава завершается рекомендацией по первичной оценке способности покрытия к защите от выпадения АСПО в динамических условиях движущейся нефтяной среды путем использования данных гидрофильности и олеофобности покрытия по краевым углам смачивания в статических условиях неподвижной нефтяной среды. Это показано для силикатно-эмалевого покрытия МК-5. Однако для полимерных покрытий однозначного влияния покрытий в работе не представлено.

6) В пятой главе приведены результаты испытаний в динамических условиях движущейся нефтяной среды на лабораторных циркуляционных стендах образцов серийных НКТ с очень ограниченным числом (всего трех) внутренних многофункциональных покрытий и одной стальной поверхности трубы без покрытия, хотя перед этим в четвертой главе при определении краевых углов смачивания использовалось заметно большее количество видов внутренней поверхности НКТ (6 видов покрытий и 3 вида поверхности стальных труб без покрытия).

7) При обсуждении рисунка 27, на котором представлена зависимость количества выпадения АСПО на сегментах НКТ с функциональным покрытием ГИОТЭК 110М и без покрытия от разницы температур между нефтяной средой и поверхностью стенки НКТ, график называется зависимостью количества выпадения АСПО от градиента температуры, то есть ставится знак равенства между градиентом температуры и разницей температур между нефтяной средой и поверхностью стенки НКТ. Это не вполне корректно, поскольку градиент температуры – это отношение разности температур в каких-то точках к расстоянию между этими точками.

Однако отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки, высокого научного уровня и практической значимости диссертационной работы и могут рассматриваться как рекомендации для дальнейших исследований в развитие этого важного научно-технического направления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа Богатова Максима Валерьевича на тему «Влияние состава, структуры и свойств внутренних многофункциональных покрытий насосно-компрессорных нефтепромысловых труб на образование асфальтосмолопарафиновых отложений» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические и технологические решения по разработке лабораторных испытательных стендов и методик определения эффективности многофункциональных покрытий нефтепромысловых насосно-компрессорных труб в защите от асфальтосмолопарафиновых отложений, имеющие существенное значение для развития страны.

Диссертация соответствует всем требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. N 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и ее автор, Богатов Максим Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

На обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертационной работы Богатова Максима Валерьевича, согласен.

Официальный оппонент,  
Заведующий кафедрой порошковой металлургии  
и функциональных покрытий,  
Директор научно-учебного центра СВС МИСиС-ИСМАН,  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСИС»,  
доктор технических наук (01.04.17 – Химическая  
физика, в том числе физика горения и взрыва),  
профессор

17 ноября 2023 г.

Левашов Е. В. / [подпись]

ПОДПИСЬ  
Проректор по общим  
и общим вопросам  
НИТУ МИСИС

[подпись]  
Исаев

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

119049, г. Москва, Ленинский проспект, 4, стр. 1  
Тел.: 7 (495) 638-45-00. E-mail: levashov@shs.misis.ru.